

地下空间开发综合治理发展战略研究

杨华勇¹, 江媛², 李喆², 高金金², 王柏村^{1,2}

(1. 浙江大学机械工程学院, 杭州 310027; 2. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

摘要: 地下空间开发利用需求旺盛、前景广阔, 但地下空间利用具有施工难度大、周期长、成本高、社会综合影响深远等特点, 尚未形成系统可靠的综合治理方法, 亟需从理论和实践两方面开展地下空间开发综合治理战略研究。本文在分析我国地下空间发展现状的基础上, 分析了地下空间开发利用与综合治理中存在的法律法规不完善、顶层设计不足、管理模式陈旧、地质调查研究不足、施工技术装备有待突破、信息资源不全、智能治理水平偏低、工程综合效益未能充分发挥等问题, 针对性提出了我国地下空间开发综合治理的发展路径和对策建议。研究认为, 在坚持长远战略目标和发展原则的基础上, 今后的主要任务是构建地下空间综合治理体系、提升地下空间综合治理水平、加快地下空间综合治理的智慧化、加强地下空间应急响应安全管理。最后, 从建立国家地下空间综合治理统一协调机制并出台专项规划, 完善法律法规、标准规范、监管评价体系, 加快部署关键核心装备技术和专业人才培养, 开展城市地下空间普查工作与信息化管理等方面提出了地下空间开发综合治理的发展建议。

关键词: 地下空间; 开发利用; 综合治理; 智慧化; 资源普查

中图分类号: TU9; F410 **文献标识码:** A

Comprehensive Management Strategy of Underground Space Development in China

Yang Huayong¹, Jiang Yuan², Li Zhe², Gao Jinjin², Wang Baicun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Zhejiang 310027, China; 2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Nowadays, there is a strong demand for underground space development in China. Meanwhile, underground space utilization has shown the characteristics of high construction difficulty, long construction period, high cost, and complex social impacts. A systematic and reliable management system for underground space development has not yet been established. Therefore, it is urgent to carry out strategic study on the comprehensive management of underground space development from both theoretical and practical aspects. By analyzing the current situation of underground space development in China, the problems in the comprehensive management of underground space are discussed from the aspects of laws and regulations, high-level design, management system, geological survey, equipment, information resource, intelligent level, and comprehensive benefit. Furthermore, the development strategy and countermeasures for underground space development in China are proposed. Considering long-term strategic objectives and development principles, the future main tasks include the establishment of a comprehensive management system, improvement in management capacity, intelligentization of space management, and reinforcement of emergency response safety management.

收稿日期: 2021-05-21; **修回日期:** 2021-06-21

通讯作者: 江媛, 中国工程院战略咨询中心高级经济师, 研究方向为交通与建造领域发展战略; E-mail: jiangyuan@cae.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新技术条件下地下空间开发综合治理发展战略研究”(2019-ZD-28)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Specifically, a national unified coordination system needs to be established for underground space comprehensive management; relevant laws and regulations, standards, and regulatory evaluation systems should be improved; technologies and professionals should be encouraged for key equipment development; and urban underground space survey and information management should be promoted.

Keywords: underground space; development and utilization; comprehensive management; intelligentization; resource survey

一、前言

在十八届三中全会《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》中,我国首次从国家层面提出“国家治理”概念,将其作为推进所有领域改革的总目标。之后,我国进一步强调城市治理是社会治理的重要环节,为我国城市现代化发展指明了方向。地下空间综合治理是城市治理的重要组成部分,以城市地下空间为客体 [1],综合运用行政、法律、技术、经济等手段,借助大数据、人工智能(AI)、云计算等前沿技术,将专业管理与统一管理相结合,对地下空间规划、设计、施工、运营维护的全过程进行决策、协调与控制,以期发挥城市地下空间开发利用整体效益 [2]。

相比地上空间,地下空间具有开发周期长、施工技术难度大、建设成本高、社会经济综合影响深远等特点 [3]。因此,开发地下空间需多方论证、谨慎决策,要有完善的政策法规、规划设计、技术装备、施工与运营体系。针对地下空间开发利用中的“责权利”关系,厘清我国地下空间开发综合治理体系存在的问题,提出地下空间开发综合治理的方案,具有深远的现实意义和广阔前景。

二、我国地下空间开发综合治理的现状和问题

(一) 我国地下空间开发综合治理的发展现状

1. 地下空间开发规模位居世界前列

与欧洲、美国等发达国家和地区相比,我国的城市地下空间开发利用起步较晚;随着近年来对地下空间开发需求的增大,开发规模、开发总量、地下综合体与地下立体交通枢纽的开发水平均处于全球前列。2016—2019年,我国累计新增城市地下空间建筑面积为 $1.07 \times 10^9 \text{ m}^2$,新增人均建筑面积达 1.26 m^2 [4]。城市轨道交通是城市地下空间开发利用的强大需求,我国在这一方面已全方位领跑全

球 [5]。截至 2020 年 12 月 31 日,我国城市轨道交通运营线路总里程达 7715.31 km,运营车站达到 5189 座,其中地铁总里程突破 6300 km [6]。目前,我国城市轨道交通已成为促进世界城市轨道交通发展的强劲动力。

2. 地下空间施工技术水平领先

近年来,我国城市地下空间开发的机械化施工技术与装备(如盾构、竖井掘进)取得了跨越式发展,技术水平位于世界前列。盾构隧道工法、近接施工安全控制技术取得了长足进步,顶管技术、非开挖技术、水下沉管技术等取得显著进展,地层位移和变形控制技术引领全球,特长山岭隧道建设技术、大断面顶管技术、水下沉管隧道技术等已属世界领先,瓦斯隧道施工通风技术、软岩大变形控制技术、隧道掘进机施工技术、全断面盾构施工技术等技术处于世界先进水平 [7]。大量新技术的应用与研发,支撑我国地下工程建设的地质适应能力和施工效率显著提升。

3. 地下空间开发的相关法律法规体系初步形成

我国初步形成了以法律和行政法规为核心,以部门规章、规范性文件为补充的地下空间法律法规体系。①《中华人民共和国民法典》《中华人民共和国土地管理法》等基础性法律明确了城市土地归国家所有,明确了土地所有权和使用权分离,为空间权设定奠定了法理基础;②我国虽在行政法规正文中未提及地下空间,但在《国务院办公厅关于印发体育强国建设纲要的通知》《国务院关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》等规范性文件中对地下空间开发都有所涉及;③《城市地下空间开发利用管理规定》等确定了我国城市地下空间开发利用管理的原则,明确了地下空间建设的前置手续,规范了地下空间工程管理;④对于地下空间管理的规范,我国已在地方性规范文件中全方位展开,多个城市制定了城市地下空间开发利用的相关规范,如上海、天津、长

春等城市颁布了地方性法规，深圳、南京、广州等16个城市颁布了地方政府规章，成都、洛阳、长沙等28个城市颁布了地方规范性文件，这些地方性规范文件有助于规范城市地下空间开发管理。

4. 地下空间开发规划体系持续优化

面对我国地下空间不断增长的开发需求，基于传统规划的总体框架，按照规划内容，形成了地下空间开发的总体规划、详细规划、专项规划等较为丰富的规划体系。其中，约有50%的城市依据总体规划和详细规划来确定地下空间规划的编制层级[8]，总体可以概括为：①对于总体规划，单独编制了地下空间的总体规划，但没有明确与城市总体规划的关系，如金华市、天津市等；将地下空间规划作为一个专项规划从属于城市总体规划，采用这种方法编制规划的城市较多，如广州市、杭州市等。②对于详细规划，可分为地下空间修建性详细规划（修规）、控制性详细规划（控规），或在修规/控规中包括地下空间规划内容；部分城市只要求编制地下空间开发利用的控规，部分城市未明确要求编制地下空间规划，但在出让地下空间使用权时，附加规划条件对地下空间开发加以约束和控制，如无锡、宁德、南昌等。③此外，少数城市要求编制建设规划、城市设计、项目方案层面的地下空间规划。尽管各类规划的范围和深度不一、层次不一，对地下空间实际开发活动的指导性和约束力不同，实施效果也有差异，但在解决实际问题方面都发挥了重要作用。各地的经验和做法为国家制定权威性、规范性的法律法规提供了依据[8]。

5. 地下空间运营管理模式不断创新提升

随着地下空间开发类型的逐步多样化，地下空间运营管理模式也不断创新提升。①投融资模式不断丰富，根据投融资主体不同，城市地下空间开发利用逐步形成了政府投融资、市场化投融资两种模式，其中市场化投融资模式包括建造—经营—移交（BOT）模式、移交—经营—移交（TOT）模式、BOT与TOT模式结合的移交—建造—移交（TBT）模式、私人融资模式等。②建设管理模式不断完善，初步形成了以设计—招标—建造、设计—施工、项目管理承包、设计—采购—建造、建设—管理等为核心的建设管理模式。③运营模式渐成体系，政府全包全管（国有国营模式）、委托运营（公私合营模式）和市场化运营3种模式成为主导。④政府监

管模式需求不断提升，地下空间作为公共物品，存在典型的外部性、自然垄断性等特点，易产生市场失灵现象；这对政府监督和管理提出了更高要求，也驱动了政府监管模式的不断创新。整体来看，地下空间的运营管理体系持续完善，运营管理模式不断创新，运营管理水平加速提升，推动地下空间开发利用进一步规范化和高效化。

6. 地下空间开发利用的综合社会影响效应凸显

在城镇化发展不断加速、生态环境要求不断提高的双重约束下，地下空间开发利用在城市发展中的地位和综合效应日益显现[9]。地下空间开发利用有助于解决目前面临的关键城市问题，破解交通拥堵与停车难的困境，缓解空气污染，改善城市环境，提升基础设施保障能力，提高城市宜居性，保障城市正常运行；有利于拓展城市空间，释放土地压力，如变电站、污水处理厂等基础设施的地下化、半地下化，可大量置换城市绿地；可提高城市防灾能力与韧性，完善地下物资储备系统和地下防灾空间体系，保障城市安全发展；有助于拉动经济增长、增加就业，助力相关产业发展。总之，地下空间开发利用具有拉动经济增长、促进产业发展、带动就业的强大动能，是我国经济增长的重要驱动力之一。

（二）我国地下空间综合治理存在的主要问题

1. 权属尚不明确，在法律层面缺乏有效保障

目前，城市地下空间法治体系存在的主要问题有：法律体系对地下空间的经营权、所有权界定不清，法律主体不明确，管理标准不统一[9]。具体来看，在国家法律层面上，尚未形成完整的法律体系，缺失城市地下空间的上位法律，诸多单行法之间存在不协调、不衔接等问题，致使其操作性差；在地下空间权利的界定、转让、获取、登记和保护等方面仍缺乏法律依据。在立法推动力上，受国家宏观政策影响较大，立法实践的形式要件与内容要件相对较多，法律文件的层级偏低，规范性和政策性的执行细则较少；相关国家规范和标准滞后于城市地下空间的发展速度[10]。法律体系建设不完善，管理依据不足，不利于地下空间资源的合理开发利用。

2. 顶层设计不足，缺乏规划层面的统筹规划

从规划实施效果来看，城市地下空间规划并没有完全发挥其在城市发展中应起的作用。①对规划

本身的研究不够完善和深入,表现为地下空间立体开发的规划研究不够深入,地上与地下统筹规划、地下的网络化开发利用规划滞后等。②规划的统筹性不足,缺乏对资源的整合布局,地下空间开发利用的规划、建设、管理之间缺乏有序衔接,导致部分地下空间重复开挖,造成资源浪费且影响后续开发利用。③可实施性和可操作性较差,这是由于地下空间产权范围的确定方法仍未明确,没有完成地下空间产权登记工作,造成穿越、出让地块实施困难,可操作性受到影响;加之相关规划的管理归属不明确,造成地下空间项目审批效率低下,阻碍了地下空间的秩序性发展 [11]。④相关规划缺乏一定力度的前瞻性研究,现有地下空间规划的出发点多是对城市地面功能的补充和完善,而未从城市可持续发展的角度考虑城市地下空间的开发利用,对地热、地下矿产资源、历史文化资源等缺乏系统和长远考虑,从可持续发展角度实现有效空间管制与统筹的难度较大 [12]。

3. 地下资源家底不清,管理和运营模式有待创新

目前,我国大部分城市尚未开展地下空间系统资源的相关调查,即使有部分城市进行了地下空间资源调查,但也仅是近期开发建设情况的了解,而对早期开发利用情况掌握不足;调查范围未实现全覆盖,调查精度不统一,加之部门之间缺乏沟通、数据共享不足、统计口径和标准不一致,导致一些地方的地下空间调查进展缓慢,资源家底难以摸清 [13]。此外,随着城市地下空间开发利用进入快速发展期,在地下空间运营管理方面仍面临诸多问题。①地下空间开发利用的部门分割、各自为政、信息不共享、数据不统一等现象较为普遍,缺少统一的监管协调机构和机制;②监管部门众多导致多头管理与无人管理现象并存,监管部门涉及多方利益与诉求而相互掣制,难以形成监管合力;③运营管理机制创新不足,多由政府承担,投资模式单一,投资动力不足,缺乏有效的成本约束机制,不利于激发社会资本参与融资和运营的活力;④安全监管机制不健全,应急管理协调难度大,除各地人防工程由人民防空办公室(民防局)统一管理外,其他地下空间并未纳入整个城市应急管理体系进行统一考虑,同时缺少安全监管机制,灾害发生时难以高效协调和应对。上述问题增加了运营监管成本,降

低了监管效率,加剧了地下空间权利冲突的可能性,制约了地下空间资源的有效开发利用 [14]。

4. 地下空间专项地质调查研究不足,不易规避地质灾害

城市地下空间的开发建设易受地质结构、地下水体、岩土特性等地质环境因素影响,无论在前期规划设计阶段,还是在后期开发建设、运营管理阶段,都需要有详尽的地质数据作为基础支撑。而目前我国多数城市的地质调查研究还很不充分,地质情况掌握不清,导致地下空间开发受阻。例如,北京、西安、兰州等城市的活动断裂,贵阳、武汉、昆明等城市的岩溶塌陷,上海、苏州、天津、宁波等城市的地面沉降,西安、太原等城市的地裂缝等,都会引起一系列地下空间开发问题。

5. 施工技术装备有待突破,尚不适应复杂开发需求

我国地下工程建设技术装备虽取得了重大突破,但仍难以适应超大、超长、超深、超快、高原、高寒等地下空间建设发展需求。①在施工技术方面,复杂地层、穿越既有建筑物等困难条件下的地下空间勘察设计技术、施工技术、智能建造技术研究等仍存在短板,地下工程施工新材料、新工艺、新技术等基础研究薄弱,没有形成国际认可的地下工程施工技术标准与理论体系。②在技术装备方面,传统装备的适用性、稳定性不佳,关键技术尚未全面突破,无法适应多元化需求;关键部件“受制于人”,国产化率不高,国际竞争力不强,产业链尚不完善,行业发展全球化布局欠缺;行业创新和技术成果转化率低,成果转化机制亟待完善,只有通过施工技术装备的创新突破,才能提升不同地质条件、高压、高地应力、高/低温、极硬/极软等极端复杂工况下的掘进和开挖能力。

6. 信息数据标准体系各异,信息资源开放共享不足

地下空间的信息数据标准不统一,信息资源开放共享不足,制约了地下空间开发利用的效率和协同创新能力,也造成了信息系统的重复建设与资源浪费 [14]。由于缺少信息综合管理部门和统一标准体系,地下空间在开发利用时面临基本状况掌握不足、主体与职责不明确、统计口径与标准不一致、地下空间信息数据资源分散等问题 [14],导致数据使用效率较低,数据收集、处理、分析与应用等平

台建设工作难以顺利开展。地下空间的信息数据量大、形式多、格式杂、分布广，信息资源共享不足，致使部分数据资源仅停留在专业管理的功能需要层面，由相关管理部门分别负责收集、储存和使用；信息化项目分散、孤立，导致信息资源的种类和内容均较缺乏，信息覆盖范围不全面；相关部门和单位对信息数据独享版权，存在不共享和不融合现象。信息化建设的不完善，制约了城市地下空间管理的信息化、标准化和精细化水平的提升。

7. 多元智能技术应用不足，智能治理水平亟待提升

地下空间开发利用的智能化需求日益强烈，但智能化技术在地下空间规划设计、智能建造、运营维护管理等方面的应用水平有待提升。①地下空间智能技术应用水平不高，物联网、云计算、建筑信息模型（BIM）、AI、大数据、区块链等新技术在地下空间创新应用的深度和广度亟待挖掘，多元传感信息融合技术、高精度可靠感知技术、新型智能传感器技术、自适应及拆除机器人等技术或产品尚未实现推广应用，新技术驱动下的“透明地壳”全生命周期管理能力、智能技术应用水平均有待提升；②地下空间综合管理智慧平台缺乏，地下空间智能化信息平台的开发整体处于起步阶段，集地下空间数据库管理、信息更新、数据查询与统计、空间分析、应急决策、数据挖掘等功能于一体的综合性管理平台较为欠缺，难以发挥地下空间全息感知、智能决策、高效管控功能；③智能运营管理水平有待提升，信息感知技术（全粒度、全时空、全对象特征感知）、信息传输技术、分析处理技术、地理信息技术在智慧化分段管控与运营、应急救援领域的优势尚未充分发挥。

8. 不良社会影响不容忽视，制约工程综合效益发挥

地下工程开发带来的部分不良社会影响，影了着地下工程综合效益。①利益冲突引发的社会矛盾，如地下空间开发过程中因土地边界模糊、权属不清等而引发的土地出让金争议、地下人防工程权属争议、小区地下车库权属争议等；②事故灾害会引发人身财产损失，导致地下空间开发难度大，如诱发突泥突水、瓦斯爆炸、施工塌陷、火灾等突发事件，成为影响城市公共安全的重要因素；③防控不力会引发生态环境污染，如地下工程开发过程中因防护

措施不到位而引发的地下水污染、交通环境振动、噪声污染、水土流失等问题。

三、我国地下空间综合治理的发展路径

（一）发展目标

按照“四个全面”战略布局、“五位一体”总体布局，深入落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念 [9]，把握“新基建”、实施城市更新行动等发展机遇，以提升地下空间治理水平、推进城市治理能力和治理体系现代化为目标，以建设韧性城市为主线，以法律法规保障为前提，以空间规划实施为抓手，重点实施四大任务。强化智能技术在地下空间全生命周期的应用创新，拓展地下空间开发利用的深度和广度，推进地下空间向深层化、综合化、智能化方向纵深发展；加强地下空间开发利用及运营管理水平，提升城市综合承载能力，最终形成地下空间高水平开发、高质量利用、高效率治理的发展新格局。未来我国地下空间发展按照探索发展期、提升发展期、全面发展期 3 个不同阶段进行目标规划。

1. 探索发展期（2021—2025 年）

到 2025 年，地下空间综合开发治理渐成体系。地下空间专项地质调查率先突破，立法前期研究稳步推进，顶层规划统筹取得进展，运营管理机制统一协调；关键施工技术创新突破，工程核心装备水平明显提升，技术标准规范整合修订，综合信息管理平台初步建成；新型信息技术加快渗透融合，综合治理各环节信息畅通衔接，初步形成体系，推动地下空间开发新局面取得积极进展。

2. 发展提升期（2026—2030 年）

到 2030 年，地下空间综合治理体系基本建成。地下空间调查数据更加完善，地方立法路径取得重要突破，分级规划与国土空间规划衔接有力，多元化运营活力迸发；复杂条件下的施工技术实现领跑，工程装备技术突破成效显著，技术标准规范密集出台；综合信息管理平台功能完备，综合治理智能化水平显著提升、各环节协调联动，推动地下空间综合治理体现高水平。

3. 全面发展期（2031—2035 年）

到 2035 年，地下空间综合治理体系全面建成。形成地下空间综合治理长效机制，推动地下空间综

合治理体系和治理能力的现代化。国家立法进程取得实质进展,功能设施规划布局更加完善,运营监管水平显著提升;施工技术与装备水平全球领先,综合治理智能化水平优势彰显,突发应急能力显著增强,安全保障体系更加有力;地下空间开发经济效益、社会效益、环境效益和谐共赢,全面建成技术先进、法律健全、规划统一、运维有序、良性循环、相互促进的综合治理生态体系,有效支撑城市治理现代化。

(二) 发展原则

一是统筹规划,协调联动。地下空间开发利用要与城市的发展战略相协调,合理确定地下空间的建设规模、时序和发展模式,稳步推进地下空间建设;坚持地上与地下空间综合统筹和一体化开发,基础设施建设应地上与地下齐头并进;加快区域地下空间一体化发展,坚持统筹安排、综合开发、合理利用,实现各类功能设施与空间“一张图”整合,鼓励竖向分层立体综合开发和横向关联空间连通开发,提高城市地下空间开发利用的整体性和系统性[9]。

二是生态优先,绿色发展。立足环境承载能力和资源禀赋能力,始终贯彻生态保护优先的理念,明确地下空间资源发展的底线;以生态安全评估为前提,合理有序利用地下空间资源,坚持生态优先、绿色发展,尊重自然规律,因地制宜开展规划编制工作[15];在资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价的基础上,科学有序统筹地下空间功能布局,实现地下空间开发治理与资源环境的和谐发展。

三是多维融合,智慧驱动。聚焦立体城市,探索地上地下协同发展路径,推动地下空间一体化设计、功能统筹、空间治理、生态保护、安全韧性、技术创新等多维信息融合共享;充分运用物联网、大数据、AI等技术,赋能城市地下空间规划、设计、建造、运营维护与安全管理全流程,全面推动新科技在地下空间开发利用和运营管理方面的融合创新;实现基础设施云端化、数据标准化、业务平台化、平台生态化、管控智能化,以智能技术助力地下空间高效开发和综合治理竞争力提升。

四是以人为本,公共优先。城市地下空间的开发利用需秉持科学、合理、适度利用原则,严格控制不适宜的开发活动;优先保障基础设施和公共服

务设施的建设空间,优先规划和安排市政工程、地下交通、人防工程、应急防灾基础设施,兼顾城市运行最优化和相邻空间发展需要,保障居民生命财产安全、地下空间权利人的合法权益[9]。

五是军用与民用相结合,平时与战备相结合。地下空间规划注重平时与战时应用相结合,兼顾人防要求的总体技术标准,与人防工程、国防设施系统发展相协调,实现人防设施的平战转化及与非人防设施的兼容,保障平时的有效利用,战时、突发事件、防灾抗灾的应急使用;创新人防工程权属管理,盘活人防工程存量资产,打造集战备、商业、交通等服务功能于一体的综合防护体系;深入探索地下人防、国防工程平时功能的多样化,强化与其他地下空间设施的整合建设、互联互通与功能转换,实现综合效益最大化。

(三) 重点任务

1. 构建我国地下空间综合治理体系

一是健全地下空间法律法规体系。①开展地下空间专属立法,从国家层面启动关于地下空间开发利用的专项立法行动,编制《城市地下空间基本法》,明确城市地下空间的用地管理、规划编制、权属使用、开发建设、运营维护等内容,科学建立我国城市地下空间的法律体系[15];对现有法律中涉及地下空间的有关规定进行修订,使其与国家层面地下空间单行法精准对接,避免下位法与上位法出现矛盾和抵触。②借鉴国外成熟经验,完善配套法规政策,在《土地管理法》中明确地下空间土地出让金标准、地下建设用地使用权、地下建设项目的产权登记等事项;建立城市地下空间规划管理、建设管理、维护管理、安全管理等方面的配套法规,确保城市地下交通运输、公共服务、市政管网、防空防灾体系等建成后能维持良好的运营状态;明确地下空间土地出让方式和土地出让金的投融资方式、缴纳标准,开发利用管理的权利与义务,税收政策,公共地下设施的使用许可规定等基本方针和政策,加快制定和完善相关标准规范,促进城市地下空间资源的有序开发[16]。

二是完善地下空间发展规划体系。在国土空间规划“四梁八柱”的顶层设计构架下,按照规划层级,明确定位关系,构建各地的地下空间分级规划体系。地下空间规划是国土空间规划体系中的一项专项规

划，在城市总体规划、详细规划层面均有相应体现与表达，应明确地下空间规划是总体规划的重要组成部分。具体来看，在详细规划层面，注重对城市地下空间形态和功能的具体指导与控制作用，注重方案实施的过程性；在专项规划层面，既可与总体规划和详细规划平行进行，又可在重点开发地区进行专项规划。针对大中型城市，需要编制重点开发地区的地下空间专项规划；规划主管部门依据国土空间总体规划，全市地下空间开发利用规划、分区规划等，组织编制重点地区地下空间开发利用规划，报市政府批准后发布实施。此外，应以立法形式来明确规划建设部门的职责，以政府主管部门为总体规划者和管理者，相关职能部门发挥主要管理作用，其他部门协调性参与管理。

三是完善地下空间运营管理体系。①适度创新地下空间投融资机制，以存量资产带动增量投资，以公共投资促进社会资本的投资，以长期收益拉动短期投资的资本需求，以制度长信化解多元化的资本逻辑冲突，带动整个地下空间的投资发展需求；②探索地下空间市场化运营管理新模式，按照分级、分类、分阶段的设计逻辑以及公司化运行机制、市场化竞争机制、平台化整合机制来设计运营管理模式，明晰责、权、利关系，完善评价、激励、约束之间的逻辑关系，推动形成责、权、利的合理配置；③厘清地下空间有限资源在不同区位和层位的定价，针对不同区域、不同深度的地下空间，提出合理、适当、可操作的定价方法，从而提升地下空间开发利用效率，防治和杜绝地下国有资产流失等问题；④强化地下空间运营管理的监督管理，建立政务公开、有序参与、网络监督理性化和规范化的社会监督体系，利用信息化手段和社会舆论工具提升政府对地下空间责任主体的监管能力，形成完备的城市地下空间监管绩效评价体系 [17]。

四是创新地下空间技术装备体系。①构建地下工程装备技术创新体系，加快新型装备的技术研发，重点推进煤矿、国防领域特种装备，川藏、青藏铁路用极端装备，异形断面岩石隧道掘进机，千米级深立井全断面掘进机，千米钻机导向取芯钻进装置，智能化注浆设备，高压电脉冲掘进装备、隧道衬砌质量检测设备等；②创新地下空间开发施工技术体系，创新地下空间勘察设计理论与方法，健全地下空间施工工法技术，完善地下工程智能建造技术，

加强地下工程建设施工组织管理，推进地下空间开发施工技术国际化，创建适应国情的地下工程施工技术标准系统。

2. 提升我国地下空间综合治理水平

一是加大地下空间综合治理技术创新突破。运用多元传感信息融合、高精度可靠感知、新型智能传感器、建筑信息模型等前沿技术，提升地下空间综合治理的智慧化水平，实现全方位、全生命周期的超级地下空间动态管理。基于 BIM、3S 等技术建立综合管理平台，实现地下空间开发进度可视化、安全隐患管理、质量管理、人员管理、物资管理、成本管理的信息集成应用；采用物联网、AI 等技术，建设环境与设备监控、通信、安全防范、预警预报功能集的系统，建立数据驱动，集管理、服务、运营为一体的综合性智慧管理平台，赋能城市地下空间工程运营维护 [14]。

二是推动地下空间全产业链协同。通过地下工程核心基础技术的创新研发，助力行业关键技术突破，实现自主可控技术升级；通过重点短板技术攻关，突破产业发展短板，实现全面超越；通过实施“走出去”战略，全面提升国产技术装备的国际市场竞争力；通过产业布局优化，打造完整产业链，推动地下工程装备新型创新链、产业链、生态链协同；做强行业龙头，打造世界一流的地下工程装备领军企业；做优关键产业，打造主轴承、减速机等核心关键部件的产业集群；做全产业链条，发展新材料、传感器、液压及电气元器件等高端配套产业集群通过全产业链协同，构建地下工程创新发展生态，支撑综合开发治理能力跃升。

三是提升地下空间综合治理的公众参与程度。推动城市治理从以政府为主向社会联合的多元主体转变，坚持制度先行，加强公众参与地下空间综合治理的机制建设；发挥政府治理作用，健全利益协调、利益表达、利益保护机制，引导民众依法表达诉求、行使权利、解决纠纷，实现政府治理、社会调节、居民自治的良性互动。在加强制度建设的同时，建立公众参与平台，推动公众有序参与、规范参与、有效参与，发挥居民自治及化解社会矛盾作用；倡导公民社会理念，确立公众参与共识。重视制定发展实施规划，构筑公众参与体系，健全长效治理机制，提升地下空间综合治理公众参与权限与深度。

3. 加快地下空间综合治理的智慧化建设

一是加快地下空间信息的透明化。采用综合探测和三维(3D)建模技术,加快透明城市建设;运用航空遥感、物探、钻探、地质调查等手段,系统探测全国各地的地质条件、地层结构、存在的地质问题等,评价地下空间开发利用的地质适宜性和资源潜力;开展地下空间开发利用地质环境监测,建立全国城市地下空间3D地质结构模型、城市地质环境信息系统、地下空间开发利用政府决策信息支撑平台[18];探索数据管理与共享机制,制定统一的信息标准,实现地上地下的信息化、一体化和可视化。透视城市现实与虚拟空间,强化城市规划、建设、管理、运维、应急的高效管理、精细管理和动态管理,提升城市综合治理水平。

二是推动装备全生命周期的智能化。着力推动地下工程装备在全寿命周期内的智能设计、智能制造、智能掘进、智能运维四位一体智能化。在初始设计阶段,使用3D协同设计,推动地下工程装备的标准化、模块化、通用化;在制造阶段,开发地下空间企业资源计划(ERP)系统、软件即制造执行系统(MES)、产品生命周期管理系统(PLM),加快地下工程装备制造向工业网络建设、系统集成、精益生产线建设、虚拟仿真方向发展;在掘进阶段,加强数据采集与存储、云计算平台、智能决策技术、智能掘进技术的融合,对掘进状态实时在线监测;在运维阶段,以大数据、云计算技术为支撑,实现云平台健康评估和故障诊断的远程智能运维服务。通过智能化、数字化、信息化管理的装备设施,推动地下空间日常管理和安全管理的智能化、数字化、信息化。

三是驱动地下空间管控的数字化。①以3D数字空间为载体,落实全域全要素管控,采用规则引擎技术将自然语言描述的空间管控和准入要求进行数字化转译,解析要素对象、约束条件并将之转化为计算机可识别和计算的3D空间管控规则,为进一步规划实施与用途管制数字化应用提供可靠依据。②以多层级、全覆盖的数字化规划传导为机制,保障规划管控内容全面贯通,构建多层级、全覆盖的规划传导机制,厘清包含各层级规划管理内容(要素、规则、模式)规划传导谱系,推动规划实施从“项目统筹”到“区域统筹”的转型。③以空间管控与准入管制数字化体系为内涵,实现用途管

制数字重塑;以规划为依据,梳理空间管控与空间准入数字化的要求,建立不同管制对象、管控要素、管控规则、管控模式之间的衔接与组合关系。科学统筹建设与非建设活动,保障“一张蓝图”在国土空间用途管制数字化管理中的全面落实。④以数字管控为驱动,落实“放管服”改革,实现全流程用途管制以智慧选址、智能审查、规划条件自动生成、方案精细审查为核心,驱动多审合一、多证合一、多测合一流程优化,确保规划管控内容与开发建设活动的有机衔接,提高用途管制科学性和行政审批效率。

四是搭建地下空间综合信息平台。依托政府主导,运用物联网、AI等技术构建统一的地下空间综合信息平台。打造集管理、服务、运营、预警为一体的综合性智慧管理平台,实现全方位、全生命周期的城市地下空间动态管理能力;发展面向城市地下空间海量多源异构数据的管理平台,面向专业技术人员应用的工作平台,面向政府部门决策的可视化辅助支撑平台,面向社会公众的信息服务平台。实现地上地下一体化数据集成展示,建成“透明城市”,支持地下空间数据的专项查询、统计和分析,匹配地下空间精细化管理;支持多维度地上地下一体化空间分析,洞察城市空间每个细节,开展大型建筑物规划适宜性辅助分析评价,服务旧城改造、新城建设;支撑水资源、水环境、水生态监测预警,解决多龙治水问题;支持地下轨道交通选址辅助决策分析,服务城市地下轨道交通建设,同步开展地下空间专项应用,服务地下空间业务部门专职专用。推行地下空间数据的动态管理、实时更新、多维一体化展示、可视化决策分析、社会化共享服务,为城市地下空间规划、建设、运行、安全、管理提供全面高效的信息服务与支撑。

4. 加强地下空间应急响应安全管理

一是加快安全韧性城市规划建设。充分体现提前规划在城市韧性提升方面的前瞻性和引导性,统筹推进韧性城市顶层制度规划,强化地下空间基础设施防护能力和系统韧性,提升区域突发事件持续性应急救援能力以及长期抵御风险能力。从地下空间灾害风险管理的全流程出发,强化“平时减灾一灾前备灾一灾中应急一灾后恢复”的灾害风险管理能力,提升城市应对地下空间重大灾害的基础韧性;在现有防灾减灾规划的基础上,着

力提升多情景下城市应对风险能力系统模拟预测与问题诊断能力。根据韧性城市规划的发展策略和行动计划，提高城市各部门的灾前应对能力、灾害响应能力、灾后恢复能力，构建“灾害风险管理台账—灾害监测预警—灾情推演仿真—规划决策辅助—灾后复盘优化”全流程的系统韧性机制。

二是完善地下空间应急响应机制。将地下空间纳入城市总体应急管理体系，建立健全地下空间安全监管和应急响应机制，实现灾害突发时的有效协调与应对。当地下空间突发事件发生或地下空间开发引起环境地质灾害发生时，及时启动应急响应机制，在判定事故性质、特点、危害程度、影响范围的基础上，迅速组织应急力量实施处置，开展人员疏散和自救互救。

三是做好地下空间的安全监管。①完善地下空间安全设施，根据火灾、水灾、爆炸、塌陷等不同灾害类型，合理设置疏散和避难空间、逃生通道、导向标识、消防设备、无积水通道、烟气探测设备、喷淋设备、内部消防通道等。②加强对地下工程结构的检测、监测和维护，针对地下管道、地铁等生命线工程，建立沉降预警监测机制，加强油气管道泄漏、给水管道漏水、排水管道渗漏破裂等市政管道的全寿命周期检测与管道修复维护，推进城市雨污混接、错接调查和雨污分流改造工作。③建立行政管理机制体系，设立专门的城市地下空间安全监管部门，明确地下空间安全监管的内容、制度、措施以及相关部门安全主体责任；加强信息沟通和共享，避免出现分头管理、多头管理、管理缺位等问题 [19]。

四、对策建议

（一）建立国家地下空间综合治理统一协调机制并出台专项规划

建议由国家发展和改革委员会牵头，会同相关部委成立部际联席领导机构，协调全国地下空间开发利用工作，对事关地下空间开发利用的政策文件、法律法规、项目规划、资源普查等重大事宜进行统筹安排；筹建国家地下空间开发利用专家委员会，对地下空间开发利用的发展策略与政策建议持续开

展储备性、战略性和前瞻性研究；立足国土空间规划，围绕五级三类的国土空间规划编制体系，强化顶层设计和规划管控，坚持开发与保护并重、地上地下协同、竖向分层与横向连通等原则，尽快出台国家级城市地下空间专项规划。

（二）完善法律法规、标准规范和监管评价体系

加快建立地下空间法律体系框架，积极推动与地下空间治理相关的法律修订，将地下空间治理方针原则和基本制度等纳入现有法律体系；修订或颁布相关地方法规、地方规章，为上位法的修订或制定提供实践案例；围绕复杂地质条件下的工程建设、复杂环境保护、深层地下空间开发、地下空间设施的安全运维和更新改造等难题，制定相关技术标准，形成集地下空间规划、设计、施工、防灾减灾、环境保护于一体的标准规范体系；完善上级监管部门对下级监管部门的评价奖惩机制、直接监管部门对地下空间运营企业的监管机制、社会监督和舆论监督机制，加快构建完备的城市地下空间监管绩效评价体系。

（三）加快部署关键核心装备技术研发和专业人才培养

瞄准我国城市地下空间综合治理“长、大、深”的发展趋势，应对复杂地质条件和极端环境等重大挑战，紧扣信息化、协同化、绿色化、分层化的发展要求，围绕重点任务，识别城市地下空间开发利用和工程装备的核心基础技术与重点短板技术；形成城市地下空间开发利用技术体系，优化工程装备产业布局并纳入国家重大研发计划和装备制造业专项。针对我国地下空间综合治理和地下空间开发利用亟需，在高校、科研机构、企业中加强相关专业人才的培养，形成一流水平的专业团队，提升地下空间开发利用与综合治理实力。

（四）开展城市地下空间普查工作与信息化管理

全面开展城市地下空间普查工作，建立普查工作协调机制，编制普查实施方案和相关技术标准。运用先进传感手段，探测全国地下空间特性，基于超前地质环境监测和预报，建立地下空间开发利用的地质适宜性和资源潜力的评价体系；采用现代新

型信息技术手段,探索数据管理与共享机制,发挥大数据分析优势,搭建地下空间开发利用的政府决策信息平台并制定统一的信息标准。通过地下空间开发利用和综合治理的科学管理、高效管理、精确管理、智能管理、动态管理,提升城市运转效率,增强城市综合治理水平。

致谢

感谢钱七虎、钟志华、陈学东、陈湘生、邵新宇、郭东明、焦栋、陈志龙、路德春、胡斌、包华、曾娇、王国盛等专家学者,刘剑、陈文磊、孟旭、谢帆等同事所作的贡献。

参考文献

- [1] 汪侠,黄贤金,甄峰,等.城市地下空间资源开发潜力的多层次灰色评价[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(8):1122-1127.
Wang X, Huang X J, Zhen F, et al. Evaluation on development potential of urban underground space resource: Multi-level grey approach [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(8): 1122-1127.
- [2] 郑怀德.试论广州市地下空间开发利用管理体制改革的[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):7-12.
Zheng H D. Study on the management system reform of urban underground space development and utilization in Guangzhou City [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 7-12.
- [3] Broere W. Urban underground space: Solving the problems of today's cities [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 55: 245-248.
- [4] 中国工程院战略咨询中心,中国岩石力学与工程学会地下空间分会,中国城市规划学会.中国城市地下空间发展蓝皮书:公共版[R].北京:中国工程院战略咨询中心,中国岩石力学与工程学会地下空间分会,中国城市规划学会,2020.
Center for Strategic Consulting of Chinese Academy of Engineering, Sub-society for Underground Space of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Chinese Society of Urban Planning. Blue book of urban underground space development in China 2020: Public edition [R]. Beijing: Center for Strategic Consulting of Chinese Academy of Engineering, Sub-society for Underground Space of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Chinese Society of Urban Planning, 2020.
- [5] 程光华,王睿,赵牧华,等.国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J].地学前缘,2019,26(3):39-47.
Cheng G H, Wang R, Zhao M H, et al. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 39-47.
- [6] 马一丁.单、双线隧道行车环境振动影响研究[D].北京:北京工业大学(硕士学位论文),2021.
Ma Y D. Study on the influence of driving environment vibration of single and double track tunnels [D]. Beijing: Beijing University of Technology(Master's thesis), 2021.
- [7] 郭陕云.我国隧道和地下工程技术的发展与展望[J].现代隧道技术,2018,55(S2):1-14.
Guo S Y. Technical development and outlook of the tunnels and underground works in China [J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(S2): 1-14.
- [8] 赵星烁,杨滔.我国城市地下空间规划管理若干问题探讨[C].青岛:2013年中国城市规划年会,2013.
Zhao X S, Yang T. Discussion on planning and management of urban underground space in China [C]. Qingdao: 2013 Annual National Planning Conference, 2013.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市地下空间开发利用“十三五”规划[EB/OL].(2016-05-25)[2021-04-10].http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201606/t20160622_227841.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. The 13th Five-Year Planning for the development and utilization of urban underground space [EB/OL]. (2016-05-25) [2021-04-10]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201606/t20160622_227841.html.
- [10] 张智峰,刘宏,陈志龙.2016年中国城市地下空间发展概览[J].城乡建设,2017(3):60-65.
Zhang Z F, Liu H, Chen Z L. Overview of urban underground space development in China in 2016 [J]. Urban and Rural Development, 2017 (3): 60-65.
- [11] 彭芳乐,乔永康,程光华,等.我国城市地下空间规划现状、问题与对策[J].地学前缘,2019,26(3):57-68.
Peng F L, Qiao Y K, Cheng G H, et al. Current situation and existing problems of and coping strategies for urban underground space planning in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 57-68.
- [12] 刘天科,周璞.加强和规范地下空间规划与开发利用的建议[J].国土资源情报,2019(8):3-7.
Liu T K, Zhou P. Suggestions on strengthening and standardizing underground space planning and development [J]. Land and Resources Information, 2019 (8): 3-7.
- [13] 孙晓玲,韦宝玺.加强城市地下空间资源管理的思考[J].中国国土资源经济,2017,30(4):26-29.
Sun X L, Wei B X. Reflections on strengthening the management of urban underground space resources [J]. Natural Resource Economics of China, 2017, 30(4): 26-29.
- [14] 油新华,何光尧,王强勋,等.我国城市地下空间利用现状及发展趋势[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):173-188.
You X H, He G Y, Wang Q X, et al. Current status and development trend of urban underground space in China [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 173-188.
- [15] 吴快捷,赵怡婷,石晓冬.国土空间规划体系下地下空间规划编制研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(12):1683-1690.
Wu K J, Zhao Y T, Shi X D. Research on underground space planning compiling under territory spatial planning system [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1683-1690.
- [16] 程维佳.城市地下空间开发利用管理体制的研究——以上海市为例[D].上海:上海交通大学(硕士学位论文),2015.
Cheng W J. Study on management system of urban underground space development and utilization—Case study from Shanghai [D].

- Shanghai: Shanghai Jiaotong University(Master's thesis), 2015.
- [17] 宋炳坚, 王岭. 城市化进程中城市地下空间运营安全监管研究 [J]. 财经论丛, 2016 (4): 98–104.
- Song B J, Wang L. Study on the safety regulation of the operation of urban underground space in the process of urbanization [J]. Collected Essays on Finance and Economics, 2016 (4): 98–104.
- [18] 章华维. 将实现地上地下一体化 城市地下空间透明化 [N]. 成都日报, 2018-11-05 (03).
- Zhang H W. It will realize the above ground and underground integration and make the urban underground space transparent [N]. Chengdu Daily, 2018-11-05(03).
- [19] 易荣, 贾开国. 我国城市地下空间安全问题探讨 [J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 1072–1079.
- Yi R, Jia K G. Discussion on the safety of urban underground space in China [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5): 1072–1079.